

دوام سیمان‌های دو و سه جزئی در برابر پدیده واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه

ابراهیم قیاسوند*

عضو هیئت علمی دانشکده فنی کبودراهنگ، دانشگاه بوعلی سینا
طیب ملکی

دانشجوی کارشناسی ارشد عمران (گرایش مهندسی و مدیریت ساخت)، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد اراک

چکیده

در سال‌های اخیر، با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی و اهمیت توجه به توسعه پایدار، ضرورت جایگزینی بخشی از کلینکر سیمان با افزودنی‌های معدنی مناسب نظیر پودر سنگ آهک، پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی، سرباره‌ها و... به خوبی درک شده است. مقاله حاضر به ارزیابی برخی خصوصیات فیزیکی و دوام سیمان‌های پرتلند، پرتلند آهکی، پرتلند پوزولانی و پرتلند پوزولانی - آهکی در برابر واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها پرداخته است. جهت انجام این پژوهش، پس از تهیه سنگدانه‌هایی نسبتاً فعال از حیث واکنش قلیایی سیلیسی، که در یکی از پروژه‌های کشور استفاده شده بود، اقدام به انجام آزمایش‌هایی چون غلظت نرمال و زمان گیرش خمیرهای سیمان، انبساط سریع شده نمونه‌های منشوری ملات در محلول سود و تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ملات در محیطی مستعد انجام این واکنش، نمودیم. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد، دوام سیمان‌های آمیخته حاوی پوزولان تراس به مقدار قابل ملاحظه‌ای از سایر سیمان‌های مورد بررسی بالاتر است. ضمناً، نتایج حاصل از روش انبساط سریع شده ملات، با روش جدید استفاده شده در این پژوهش، انطباق نسبتاً خوبی داشت.

واژه‌های کلیدی: واکنش قلیایی سیلیسی، پودر سنگ آهک، تراس، مقاومت فشاری، انبساط سریع شده.

* نویسنده مسئول: e.ghiasvand@basu.ac.ir

۱- مقدمه

می‌شود [۲]. از عمده‌ترین روش‌های جلوگیری از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها می‌توان به عدم استفاده از سنگدانه‌های واکنش‌زا، محدود نمودن مقادیر قلیایی‌های سیمان و استفاده از مواد مکمل سیمانی (خصوصاً مواد پوزولانی) اشاره نمود. البته تاثیرگذاری و درصد مقدار بهینه هر ماده پوزولانی، باید طی آزمایش‌هایی تعیین شود. این میزان بهینه، بستگی به مقدار واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها و کیفیت و ترکیب مواد پوزولانی دارد.

در چند دهه اخیر به دلایلی چون بالا بودن هزینه تأمین انرژی، کاهش آلاینده‌گی صنعت سیمان، استفاده بهینه از منابع طبیعی و بهبود پایایی محصولات پایه سیمانی، استفاده از سیمان‌های آمیخته روبه افزایش است. به طور مثال، یکی از پر مصرف‌ترین سیمان‌های آمیخته در سطح قاره اروپا، سیمان پرتلند آهکی است [۷]. غالب مطالعات انجام‌شده در حوزه پایایی محصولات ساخته شده از این نوع سیمان و یا سیمان‌های چند جزئی حاوی پودر سنگ آهک، بر دوام آن‌ها در محیط‌های سولفاتی متمرکز شده است. از این‌رو، تاکنون مطالعات بسیار محدودی در ارتباط با دوام محصولات پایه سیمانی ساخته شده از این نوع سیمان‌ها در برابر پدیده واکنش قلیایی سنگدانه‌ها انجام شده است [۸]. اما در در رابطه با کنترل واکنش قلیایی سنگدانه‌ها توسط مواد پوزولانی، مطالعات متعددی توسط محققین داخلی و خارجی انجام شده است. به طور مثال، Karakurt و همکاران [۹]، اثر مثبت استفاده از پوزولان زئولیت، رمضانیان پور و همکاران [۱۰]، اثر مثبت استفاده از پوزولان خاکستر بادی برنج و حسن پور و همکاران نیز [۱۱]، اثر مثبت استفاده از پوزولان تراس را در کنترل این واکنش مخرب بوضوح نشان دادند.

مقاله حاضر به ارزیابی برخی خصوصیات فیزیکی و دوام سیمان‌های پرتلند، پرتلند آهکی، پرتلند پوزولانی و پرتلند پوزولانی - آهکی در برابر پدیده قلیایی سنگدانه‌ها پرداخته است. جهت انجام این پژوهش، پس از تهیه سنگدانه‌هایی که از حیث واکنش قلیایی سیلیسی در رده مشکوک قرار داشتند، اقدام به انجام آزمایش‌هایی چون غلظت نرمال، زمان گیرش، انبساط تسریع‌شده نمونه‌های منشوری ملات در محلول سود و تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ملات (که در محیطی مستعد انجام این واکنش قرار داشتند) نمودیم. یکی از اهداف این پژوهش، ارائه روشی نوین جهت ارزیابی دوام ملات‌های ساخته شده در برابر این پدیده

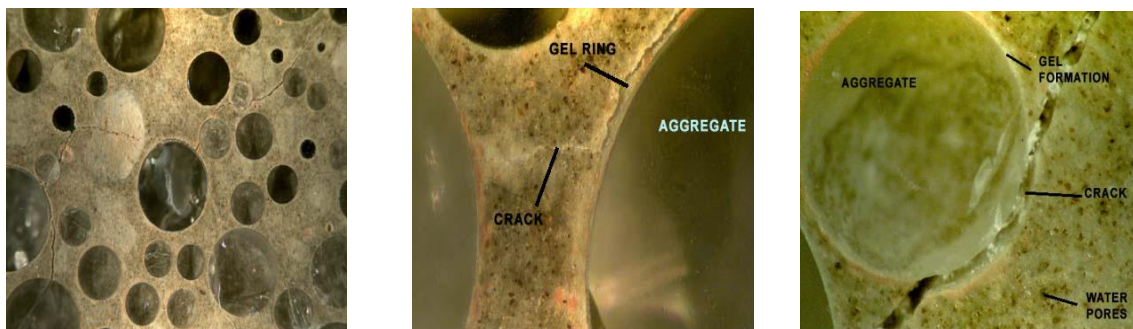
پدیده واکنش قلیایی سنگدانه‌ها واکنشی است شیمیایی، که بین یون هیدروکسید و برخی از انواع سنگدانه‌های موجود در بتن اتفاق می‌افتد. یون هیدروکسید به صورت هیدروکسید سدیم و پتاسیم در سیمان پرتلند یافت می‌شود. آب نیز به عنوان یکی از مواد اصلی بتن، نقش یک کاتالیزور را در این واکنش ایفا کرده و باعث تسریع آن می‌شود.

این واکنش می‌تواند به سه شکل در بتن رخ دهد. در حالت اول که واکنش قلیایی سیلیسی نام دارد، این واکنش بین یون هیدروکسید موجود در سیمان و سنگدانه‌های سیلیسی، سیلیسی چخمافی، بلورهای آتشفشانی و مانند اینها اتفاق می‌افتد. در طی این نوع واکنش، یک ژل سیلیکاتی در بتن ایجاد شده که قابل انبساط بوده و سبب وقوع تورم و ترک در بتن می‌شود. در شکل ۱، شکل‌گیری این ژل و چگونگی گسترش ترک در داخل خمیر سیمان تحت اثر این واکنش مخرب نمایش داده شده است.

در صورتی که میزان سنگدانه‌هایی که از موادی چون شن چرتی تشکیل شده‌اند در بتن بین ۱ تا ۵ درصد باشد، انبساط بتن سریع‌تر شده و پس از ۱۰ سال ترک‌هایی در بتن دیده می‌شود. این نوع از واکنش را می‌توان شایع‌ترین حالت واکنش قلیایی سنگدانه‌ها دانست. برخی محققین این واکنش را ناشی از تمرکز یون‌های هیدروکسید در محلول‌های منفذی می‌دانند. حالت دوم (واکنش قلیایی سیلیس - سیلیکاتی)، بیشتر به دلیل وجود کوارتز رخ داده و طی آن علاوه بر بتن، سنگدانه‌های درشت بتن نیز دچار انبساط می‌شوند. تحت اثر این نوع واکنش، ترک‌های بتن پس از گذشت بیش از ۲۰ سال، قابل رویت است. حالت سوم از این واکنش (واکنش قلیایی کربناتی)، بین سنگ آهک دولومیت و یون هیدروکسید رخ داده و فراوانی آن در مقایسه با دو حالت قبلی کمتر می‌باشد. تحت اثر این واکنش، پس از گذشت پنج سال از عمر بتن، ترک‌هایی در آن ایجاد می‌شود [۶-۱].

به طور کلی علائم مشترک در تشخیص واکنش قلیایی سنگدانه‌ها را می‌توان به دو دسته علائم اولیه و نهایی تقسیم نمود. در ابتدای وقوع این پدیده مخرب، علائمی چون ترک‌های نقشه‌ای، سفیدک، ایجاد یک پوسته سخت روی بتن و حلقه‌های سفید رنگ در اطراف ذرات سنگدانه بروز می‌کند. پس از تداوم این واکنش، علائمی دیگر نظیر ترک‌های شدید و کاهش مقاومت بتن نمایان

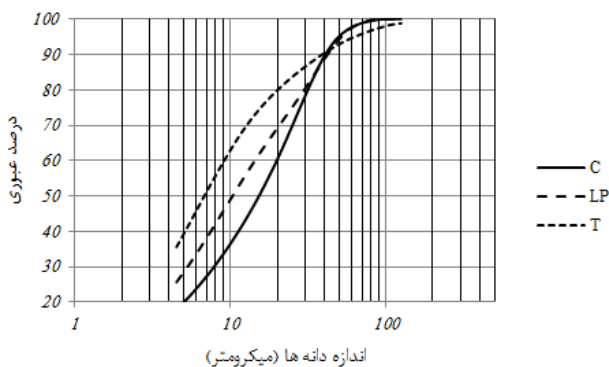
مخرب بوده است؛ بررسی تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های معرفتی برنامه آزمایشگاهی، ارائه نتایج بدست آمده در این پژوهش مکعبی ملات در همین راستا صورت گرفته است. در ادامه، به و تفسیر آن‌ها پرداخته‌ایم.



شکل ۱- شکل‌گیری ژل و گسترش ترک در بتن [۱]

جدول ۱- معرفتی سیمان‌های مورد مطالعه شده در این پژوهش

اجزای سازنده (بر حسب درصد)			نام سیمان
پوزولان تراس (T)	پودر سنگ- آهک (LP)	سیمان نوع دو (C)	
-	-	۱۰۰	100C
-	۵	۹۵	95C+5L
-	۱۰	۹۰	90C+10L
-	۲۰	۸۰	80C+20L
۵	-	۹۵	95C+5T
۱۰	-	۹۰	90C+10T
۲۰	-	۸۰	80C+20T
۵	۲۰	۷۵	75C+20L+5T
۱۰	۱۵	۷۵	75C+15L+10T



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی سیمان (C)، پودر سنگ آهک (LP) و پوزولان طبیعی (T)

۲- برنامه آزمایشگاهی

۱-۲- مصالح مصرفی

سیمان پرتلند نوع دو مورد استفاده در این پژوهش، از کارخانه هگمتانه همدان تهیه شد. همچنین سنگ آهک و پوزولان طبیعی مصرفی (پوزولان تراس) نیز توسط کارخانه سیمان تهران در اختیار پژوهشگران قرار گرفت. مصالح سنگی مصرفی در مطالعه حاضر (جهت انجام آزمایش تسریع شده واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه-ها)، از مصالح حاصل از حفاری تونل انتقال آب سد گاوشان تهیه شد. سیمان‌های مورد مطالعه در این مقاله، شامل سیمان‌های پرتلند نوع دو، پرتلند آهکی، پرتلند پوزولانی و پرتلند پوزولانی-آهکی بوده که در جدول ۱، معرفتی شده‌اند. علاوه بر این، مشخصات فیزیکی و شیمیایی اجزای سازنده این سیمان‌ها در جدول ۲ قابل ملاحظه است. ضمناً منحنی‌های دانه‌بندی سیمان پرتلند نوع دو، پودر سنگ آهک و پوزولان طبیعی مصرفی در این پژوهش (پوزولان تراس) در شکل ۲، قابل ملاحظه است.

۲-۲ روش انجام آزمایش‌ها

در پژوهش حاضر، آزمایش‌های تقاضای آب (غلظت نرمال)، زمان گیرش، انبساط تسریع شده نمونه‌های منشوری ملات در محلول سود و تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ملات (که در محیطی مستعد انجام این واکنش قرار داشتند) انجام شده است. در ادامه، روش انجام و جزئیات مربوط به این آزمایش‌ها ذکر شده است:

۲-۲-۱- میزان تقاضای آب

میزان تقاضای آب سیمان‌ها، با استفاده از روش آزمایش تعیین غلظت نرمال خمیر سیمان [۱۲]، بدست آمد.

۲-۲-۲- زمان گیرش سیمان‌ها

زمان گیرش سیمان‌ها با استفاده از روش آزمایش تعیین زمان گیرش سیمان توسط سوزن ویکات [۱۳]، تعیین شد.

۲-۲-۳- آزمایش تسریع شده انبساط نمونه‌های منشوری

ملات در محلول سود

این آزمایش مطابق با روش استاندارد ASTM C1567 [۱۴] انجام شد. با توجه به جایگزینی بخشی از سیمان با پوزولان طبیعی تراس و پودر سنگ‌آهک و جهت دستیابی به نتایج دقیق‌تر، قرائت‌های تغییر طول تا سن ۳۵ روز ادامه یافت.

۲-۲-۴- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی

ملات در محیط مستعد انجام واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها

معمولاً خسارات وارده بر بتن یا محصولات پایه سیمانی ناشی از واکنش مخرب قلیایی سنگدانه‌ها در اثر چندین عامل همزمان بوجود می‌آید و در صورت عدم وجود حتی یکی از این عوامل، این واکنش رخ نخواهد داد. محققین معتقدند جهت انجام این واکنش، وجود توأمان رطوبت (هر چه بیشتر، واکنش شدیدتر)، سنگدانه‌های واکنش‌زا و قلیایی‌ها در سیستم (که معمولاً از سیمان مصرفی تأمین می‌شوند) لازم است [۱]. علاوه بر این با افزایش زمان و دمای محیط نیز، بر شدت این واکنش افزوده می‌شود.

با توجه به توضیحات فوق در این پژوهش، جهت ارزیابی دوام محصولات پایه سیمانی در برابر واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها (ASR)، از روشی ابداعی استفاده گردید. به این منظور، محفظه‌ای که در آن امکان تنظیم رطوبت و دما به صورت توأمان وجود داشت، تهیه شد. سپس نمونه‌های مکعبی ملات (به ابعاد ۵×۵×۵ سانتی‌متر) مشابه با طرح مخلوط مشروح در استاندارد ASTM C1567 [۱۴]، با اندکی تفاوت تهیه شد.

نمونه‌ها پس از عمل‌آوری رطوبتی به مدت هفت روز، در محفظه-ای با دمای ۴۰ درجه سلسیوس و رطوبت بیش از ۹۰ درصد، به مدت یک‌سال قرار گرفتند و تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها تا یک‌سال مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است جهت تسریع در وقوع واکنش قلیایی سنگدانه‌ها، مقداری سود حین ساخت نمونه‌های مکعبی ملات به سیستم افزوده شد (در همه طرح مخلوط‌ها، مقدار سود معادل برابر با ۲ درصد در نظر گرفته شد). علاوه بر این، رطوبت و دمای نسبتاً بالا در این محفظه نیز، شدت واکنش را تشدید می‌کند.

جهت تأمین ۲٪ سود معادل در نمونه‌های مورد بررسی، هیدروکسید سدیم به صورت محلول در آب اختلاط به طرح مخلوط نمونه‌های ملات اضافه شد.

در ادامه و به عنوان نمونه، محاسبات مرتبط با میزان سود مورد نیاز جهت حل‌شدن در آب اختلاط، برای طرح 90C+10L ذکر شده است. لازم به ذکر است محاسبات ارائه شده در ذیل، از استاندارد ASTM C1293، الگوبرداری شده است.

در صورتی که فرض کنیم برای ساخت هر طرح مخلوط ملات، از ۱۰۰۰ گرم سیمان استفاده کنیم؛ می‌توان محاسبات را به نحو ذیل انجام داد:

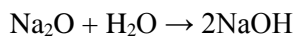
الف) تعیین میزان قلیایی موجود در ۱۰۰۰ گرم سیمان بر حسب درصد:

$$0.9 \times (\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}})_C + 0.1 \times (\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}})_{LP} = 0.9 \times 0.994 + 0.1 \times 0.295 = 0.9241$$

ب) میزان قلیایی مورد نیاز که باید به سیستم اضافه شود تا مقدار قلیایی کل، به ۲٪ برسد:

$$2\% - 0.9241\% = 1.0759\%$$

پ) تعیین مقدار قلیایی مورد نیاز باید بصورت Na_2O ، به آب اختلاط اضافه شود:
همانطور که می‌دانیم:



Molecular Weight of Na_2O : 61.98

Molecular Weight of NaOH : 39.997

لذا مقدار هیدروکسید سدیمی (NaOH) که باید در داخل آب اختلاط حل شود، به ترتیب زیر بدست می‌آید:

$$2 \times \frac{39.997}{61.98} \times \frac{1.0759}{100} \times 1000 = 13.886\text{gr}$$

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی اجزای سازنده سیمان‌های مورد بررسی

مشخصه	سیمان (C)	پودر سنگ آهک (LP)	تراس (T)	مشخصه	سیمان (C)	پودر سنگ آهک (LP)	تراس (T)
Calcium oxide (CaO) (%)	63.54	51.01	2.99	LOI (%)	1.۴	41.68	7.43
Silicon dioxide (SiO ₂) (%)	21.44	2.48	69.38	Free water (%)	-	-	-
Magnesium oxide (MgO) (%)	1.48	2.46	1.61	Combined water (%)	-	-	-
Aluminium oxide (Al ₂ O ₃) (%)	4.52	1.55	12.66	SiO ₂ + Insoluble water (%)	-	-	-
Ferric oxide (Fe ₂ O ₃) (%)	3.69	0.45	2.16	CaCO ₃ (%)	-	91.1	-
Sulphate oxide (SO ₃) (%)	2.26	0.03	-	TOC (%)	-	0.09	-
Potassium oxide (K ₂ O) (%)	0.72	0.151	1.905	Clay Content (gr/100 gr)	-	0.14	-
Sodium oxide (Na ₂ O) (%)	0.52	0.196	1.513	Moisture Content (%)	-	0.37	-
Titanium oxide (TiO ₂) (%)	0.15	-	-	Specific Gravity	3.۱۲	2.68	2.32
Phosphorus oxide (P ₂ O ₅) (%)	0.05	-	-	Blaine (cm ² /gr)	3350	7800	8500

۳- شرح و تفسیر نتایج

۳-۱- تقاضای آب و زمان گیرش

علاوه بر این، زمان‌های گیرش اولیه و نهایی سیمان‌های پرتلند آهکی حاوی تا ۱۰ درصد پودر سنگ آهک، در مقایسه با سیمان شاهد، اندکی کاهش یافته است. اما در کلیه سیمان‌های حاوی پوزولان طبیعی تراس و سیمان پرتلند آهکی حاوی ۲۰ درصد پودر سنگ آهک، تا حدودی افزایش یافته است.

تسریع در وقوع گیرش خمیرهای سیمان حاوی مقادیر کم پودر سنگ آهک را می‌توان به غلبه اثر مثبت پدیده هسته‌زایی غیرهمگن بر اثر منفی رقیق‌سازی کلینکر نسبت داد. اما تأخیر در گیرش سایر سیمان‌ها را می‌توان به غلبه اثر منفی رقیق‌سازی کلینکر بر اثر مثبت پدیده هسته‌زایی غیرهمگن نسبت داد.

ضمناً در سیمان‌های حاوی تراس، این موضوع به دلیل کم‌بودن سرعت انجام واکنش‌های این سیمان‌ها در مقایسه با سایر نمونه‌ها، تشدید شده است. لازم به ذکر است زمان‌های گیرش اولیه و نهایی کلیه سیمان‌های مورد بررسی، در محدوده مجاز تعریف شده در استانداردهای بین‌المللی [۲۰-۲۱] و ملی ایران [۲۲-۲۳] قرار دارد.

نتایج تقاضای آب و زمان‌های گیرش خمیرهای سیمان مورد بررسی در جدول ۳ قابل ملاحظه است. با دقت در این نتایج ملاحظه می‌شود تقاضای آب در سیمان‌های حاوی پودر سنگ-آهک به میزان ناچیزی نسبت به سیمان پرتلند کاهش یافته است. این موضوع را می‌توان به پدیده رقیق‌سازی کلینکر (کاهش جزء فعال‌تر) نسبت داد. این یافته توسط محققین دیگری نیز گزارش شده است [۸، ۱۵-۱۹]. اما در سیمان‌های حاوی تراس (سیمان‌های پرتلند پوزولانی و پرتلند پوزولانی - آهکی)، به دلیل جذب آب بالای این پوزولان طبیعی افزایش قابل توجهی داشته است. بیشترین میزان تقاضای آب بین تمامی سیمان‌های مورد بررسی به سیمان پرتلند پوزولانی حاوی ۲۰ درصد تراس مربوط بوده که این میزان حدود ۲۲ درصد از تقاضای آب سیمان شاهد (پرتلند)، بیشتر بوده است.

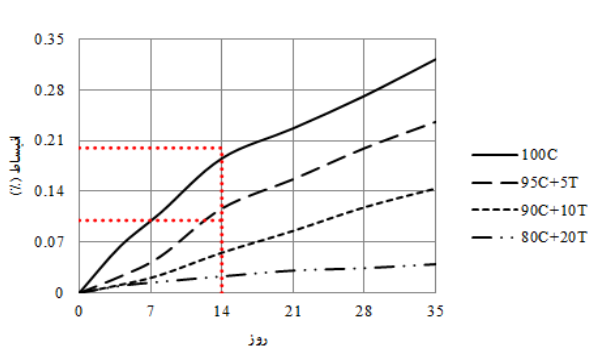
جدول ۳ - مقادیر تقاضای آب و زمان‌های گیرش اولیه و ثانویه

نوع سیمان	تقاضای آب (%)	گیرش اولیه (دقیقه)	گیرش نهایی (دقیقه)
100C	23	185	265
95C+5L	22.6	175	250
90C+10L	22.4	180	262
80C+20L	22	190	271
95C+5T	24.5	192	270
90C+10T	26.2	195	272
80C+20T	28.1	199	275
75C+20L+5T	24	193	273
75C+15L+10T	25.6	196	270

۳-۲- انبساط تسریع شده نمونه‌های منشوری ملات

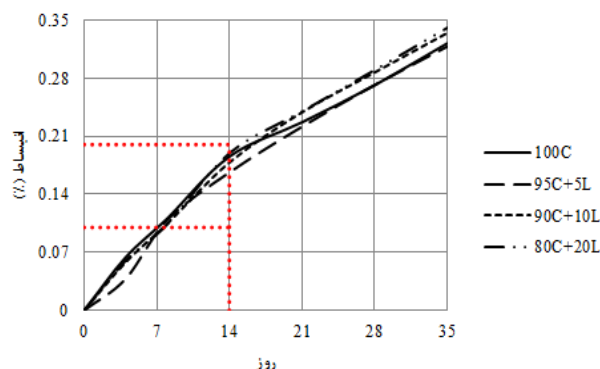
در شکل ۳ (الف، ب و ت) نتایج آزمایش تسریع شده انبساط نمونه‌های منشوری ملات‌های مورد بررسی ارائه شده است. جهت انجام این آزمایش از یکی از سنگدانه‌های مشکوک (از حیث دارا بودن پتانسیل واکنش قلیایی سیلیسی) استفاده گردید. با دقت در نتیجه بدست آمده ملاحظه می‌شود میزان انبساط نمونه‌های منشوری ملات ساخته شده از سیمان پرتلند نوع دو در سن ۱۴ روز، نزدیک به ۰/۲ درصد بوده و سنگدانه‌های مصرفی را می‌توان بر اساس استاندارد ASTM C1567، در رده مشکوک قرار داد. همچنین، استفاده از سیمان‌های حاوی پودر سنگ آهک نیز نتوانسته از وقوع این واکنش به میزان قابل توجهی جلوگیری نماید و این دسته از سیمان‌ها (با مقادیر تا ۱۰ درصد پودر سنگ آهک) عملکرد نسبتاً مشابهی با سیمان پرتلند داشته است. اما استفاده از پوزولان تراس (هم در سیمان‌های پرتلند پوزولانی و هم در سیمان‌های پرتلند پوزولانی - آهکی) به میزان قابل ملاحظه‌ای منجر به کاهش انبساط شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد، بیشترین و کمترین میزان انبساط ۳۵ روزه، به ترتیب، مرتبط با سیمان‌های پرتلند آهکی حاوی ۲۰ درصد پودر سنگ آهک و پرتلند پوزولانی حاوی ۲۰

درصد تراس می‌باشد. افزایش میزان انبساط در سیمان‌های حاوی پودر سنگ آهک، با افزایش میزان این پودر را می‌توان به تضعیف خواص مکانیکی این سیمان‌ها با افزایش این ماده معدنی نسبت داد. Hobbs در سال ۱۹۸۳، نشان داد زمان وقوع واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در صورت استفاده از ۵ درصد پودر سنگ آهک، اندکی به تأخیر می‌افتد اما در نهایت نمی‌تواند آسیب‌های ناشی از این پدیده را از قبیل بروز ترک و انبساط، حذف نماید [۲۴]. در پژوهش حاضر نیز ملاحظه شد رفتار نمونه‌های ساخته شده از سیمان‌های پرتلند آهکی حاوی تا ۱۰ درصد پودر سنگ آهک، به میزان زیادی مشابه نمونه‌های ساخته شده از سیمان پرتلند (نمونه‌های شاهد) است. همچنین بهبود عملکرد نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی تراس را می‌توان به واکنش پوزولانی بسیار موثر این ماده نسبت داد. نتیجه بدست آمده در این پژوهش، یافته‌های سایر محققین در خصوص افزایش دوام محصولات ساخته شده از سیمان‌های پوزولانی در برابر واکنش قلیایی سنگدانه‌ها را تأیید می‌نماید. به عنوان مثال، Hasparyk و همکاران، نشان دادند استفاده از پوزولان‌های خاکستر پوسته برنج و دوده سیلیس به میزان قابل توجهی در کنترل آسیب‌های ناشی از این پدیده، موثر بوده است [۲۵]. ضمناً می‌توان جهت دستیابی به نتایج دقیق‌تر، آزمایش‌های تکمیلی دیگری نظیر مطالعات دراز مدت نمونه‌های ملات و بتن و بررسی ریزساختار این نمونه‌ها را با استفاده از تصاویر SEM در دستور کار قرار داد. به عنوان مثال، Safeer و همکاران [۲۶] نشان دادند استفاده از پوزولان مصنوعی خاکستر پوسته برنج در کنترل این پدیده بسیار مثرتر بوده است. این محققین علاوه بر انجام آزمایش‌های متداول (نظیر انبساط تسریع- شده نمونه‌های منشوری ملات)، با استفاده از تصاویر SEM و آنالیز EDS، بر ارزش یافته‌های خود افزودند. نتایج آنالیز ریزساختار انجام شده در پژوهش آن‌ها نشان داد، ترک‌ها در نمونه‌های حاوی پوزولان خاکستر پوسته برنج به شدت کاهش یافته و یا حتی به صورت کامل حذف شده است. ضمناً در نمونه‌های حاوی این پوزولان، نسبت پایین کلسیم به سیلیس با مقدار بیشتر آلومین، منجر به کاهش میزان قلیایی در سیستم شده و به دنبال آن انبساط‌های ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها کاهش یافته است.



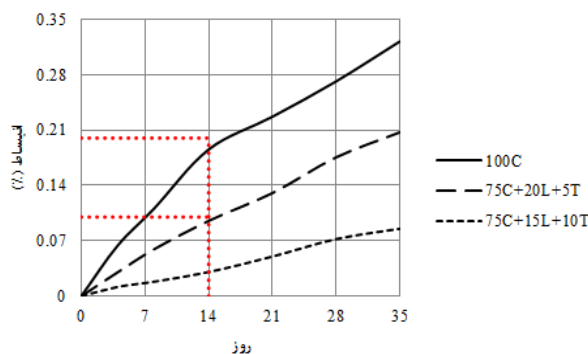
ب) ملات‌های ساخته شده از سیمان‌های پرتلند و پرتلند

پوزولانی



الف) ملات‌های ساخته شده از سیمان‌های پرتلند و پرتلند

آهکی



ب) ملات‌های ساخته شده از سیمان‌های پرتلند و پرتلند پوزولانی - آهکی

شکل ۳ - نتایج انبساط تسریع شده نمونه‌های منشوری ملات‌های ملات‌های مورد بررسی

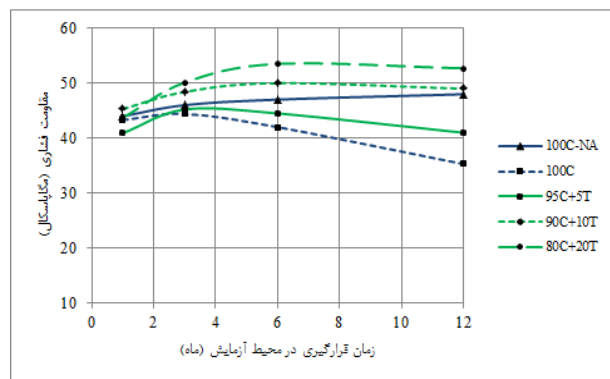
نمونه‌ها، روند کسب مقاومت به شکلی دیگر بوده است. با دقت در شکل (۴-الف)، ملاحظه می‌شود در نمونه‌های ساخته شده از سیمان‌های پرتلند و پرتلند آهکی پس از گذشت شش ماه از قرارگیری در محیط آزمایش، افت مقاومت قابل ملاحظه‌ای رخ داده است. بیشترین میزان افت مقاومت، مرتبط با نمونه‌های ساخته شده از سیمان پرتلند آهکی حاوی ۲۰ درصد پودر سنگ آهک بوده و نمونه‌های ساخته شده از سیمان‌های پرتلند آهکی حاوی ۱۰ تا ۲۰ درصد پودر سنگ آهک، عملکرد نسبتاً مشابهی با سیمان پرتلند داشته است. هم‌چنین استفاده از سیمان‌های پوزولانی (خصوصاً سیمان‌های حاوی بیش از ۵ درصد تراس)، در جلوگیری از وقوع افت مقاومت در نمونه‌ها، به شدت موثر بوده است. به طور مثال، در نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد پوزولان طبیعی تراس نه تنها کاهش مقاومت رخ نداده، بلکه این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های 100C-NA نیز، از مقاومت بالاتری برخوردارند. عملکرد مناسب نمونه‌های ساخته شده از سیمان‌های پرتلند پوزولانی را می‌توان به واکنش‌های پوزولانی پوزولان طبیعی تراس نسبت داد.

۳-۳- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ملات در محیطی مستعد وقوع ASR

در شکل ۴ (الف، ب و ت) نتایج تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ملات در محیطی مستعد وقوع واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها ارائه شده است. شرح این محیط در بخش ۲-۲ ارائه شده است. در این نمودارها، عبارت 100C-NA، مرتبط با نمونه‌های ساخته شده از سیمان پرتلند مصرفی در این پژوهش بوده که در حین ساخت، به آن هیدروکسید سدیم اضافه نشده است. اما در سایر نمونه‌ها، جهت تأمین دو درصد سود معادل، هیدروکسید سدیم به صورت محلول در آب اختلاط به طرح مخلوط آن‌ها اضافه شده است. با دقت در نتایج، ملاحظه می‌شود پس از گذشت یک سال از آغاز قرارگیری نمونه‌ها در محیط آزمایش، مقاومت فشاری نمونه‌های 100C-NA با شیب نسبتاً ملایمی روبه افزایش بوده است. به بیان دیگر، در طرح 100C-NA، مقدار قلیایی مورد نیاز جهت تسریع در وقوع واکنش قلیایی سیلیسی، کافی نبوده و این نمونه‌ها روند طبیعی کسب مقاومت را طی نموده‌اند. اما در سایر

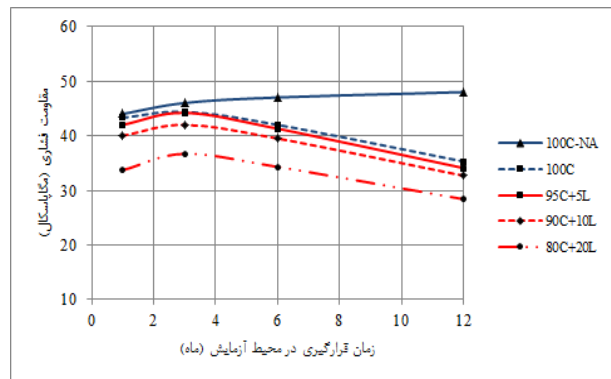
نتایج آزمایش‌های مشروح در بخش‌های ۳-۲ و ۳-۳ این مقاله، ارتباط معناداری برقرار است. به بیان دیگر، در هر دو بخش یاد شده، سیمان‌های حاوی پوزولان تراس، بهترین عملکرد را از خود نشان داده‌اند. با افزایش این پوزولان، رفتار در برابر پدیده مخرب واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها بهبود یافته و در طرف مقابل، با افزایش پودر سنگ آهک، از ۱۰ درصد به ۲۰ درصد با تضعیف قابل توجه رفتار نمونه‌ها در این پدیده مواجه شده‌ایم.

ضمناً، با توجه به نتایج مندرج در شکل (۴-ب)، ملاحظه می‌شود، در سیمان پرتلند پوزولانی - آهکی حاوی ۱۰ درصد تراس (75C+15L+10T)، افت مقاومتی در گذر زمان رخ نداده و در نمونه‌های ساخته شده از سیمان 75C+20L+5T، اندکی کاهش مقاومت پس از گذشت یک‌سال از آغاز قرارگیری در محیط آزمایش رخ داده است. عملکرد نسبتاً قابل قبول این سیمان‌ها در برابر پدیده مخرب ASR را می‌توان به وجود پوزولان طبیعی مرغوب تراس نسبت داد. در خاتمه می‌توان عنوان نمود، بین



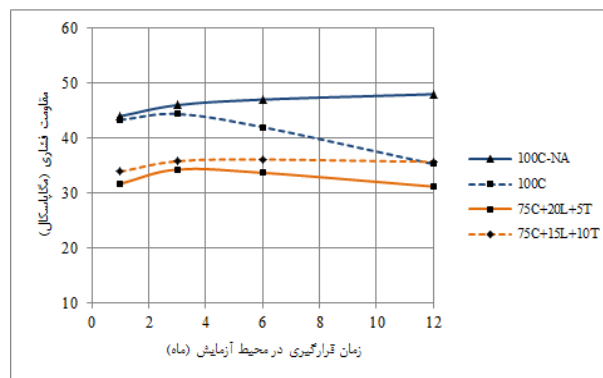
ب) نمونه‌های مکعبی ساخته شده از سیمان‌های پرتلند و پرتلند

پوزولانی



الف) نمونه‌های مکعبی ساخته شده از سیمان‌های پرتلند و پرتلند

آهکی



پ) نمونه‌های مکعبی ساخته شده از سیمان‌های پرتلند و پرتلند پوزولانی - آهکی

شکل ۴ - نتایج تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ملات در محیطی مستعد وقوع واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها

پوزولان طبیعی، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

۲- در سیمان‌های حاوی مقادیر کم پودر سنگ آهک، زمان گیرش اندکی کاهش و در سیمان‌های حاوی مقادیر زیاد پودر سنگ آهک و پوزولان طبیعی تراس، افزایش یافته است.
 ۳- به نظر می‌رسد که سیمان‌های حاوی مقادیر کم پودر سنگ آهک (تا ۱۰ درصد) از نظر قابلیت کنترل واکنش قلیایی سیلیسی

۴- نتیجه گیری

مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت مندرج در ذیل بیان نمود:

۱- میزان تقاضای آب در سیمان‌های حاوی پودر سنگ آهک به میزان ناچیزی نسبت به سیمان پرتلند کمتر بوده اما در سیمان‌های حاوی پوزولان طبیعی تراس، به علت جذب آب بالای این

Cement and Concrete Research, 40 (6), pp 892-897, 2010.

[7] قیاسوند، ا. (۱۳۹۳)، "اثر اندازه ذرات پوزولان تراس، سنگ-آهک و مخلوط تراس - آهک در خواص مکانیکی و دوام ملات‌های ساخته شده در برابر سولفات"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

[8] Ghiasvand E, Ramezaniapour AA, Ramezaniapour AM., "Influence of grinding method and particle size distribution on the properties of Portland-limestone cements" Materials and Structures, 48, pp 1273-1283, 2015.

[9] Karakurt C, Topçu I., "Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete" Construction and Building Materials, 25, pp 1789-1795, 2011.

[۱۰] رمضانپور، ع. ضرابی، ک. مهدی‌خانی، م. احمدی، غ؛ "تولید بهینه خاکستر پوسته برنج و بررسی اثر بتن‌های ساخته شده با این خاکستر در پدیده واکنش قلیایی"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.

[۱۱] حسن‌پور، ص.ع. حاجی‌وثوق، ش. بیدگلی، ش. نوین‌فرد، ب. رمضانپور، ع. قیاسوند، ا؛ "بررسی تاثیر پوزولان تراس در خواص مکانیکی و برخی از پارامترهای دوام بتن"، پنجمین کنفرانس سالیانه ملی بتن ایران، تهران، ۱۳۹۲.

[12] ASTM C187, "Standard test method for normal consistency of hydraulic cement", ASTM International, West Conshohocken, 2004.

[13] ASTM C191, "Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle", ASTM International, West Conshohocken, 2004.

[14] ASTM C1567, "Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)", ASTM International, West Conshohocken, 2004.

[15] Schiller B, Ellerbrock H-G., "The grinding and properties of cement with several main constituents". Zement- Kalk-Gips, 45 (7), pp 325-334, 1992.

[16] Irassara EF, Violini D, Rahhal VF, Milanese C, Trezza MA, Bonavetti VL., "Influence of limestone content, gypsum content and fineness on early age properties of Portland limestone cement produced by inter-grinding", Cement and Concrete Composite, 33 (2), pp 192-200, 2011.

[17] Elkhadiri I, Diouri A, Boukhari A, Aride J, Puertas F., "Mechanical behaviour of various mortars made by combined fly ash and limestone in

سنگدانه‌ها، رفتاری مشابه با سیمان‌های پرتلند معمول (فاقد مواد جایگزین سیمان) داشته باشند.

۴- افزودن پوزولان طبیعی تراس به سیمان‌های آمیخته، به میزان قابل ملاحظه‌ای دوام محصولات پایه سیمانی ساخته از آن‌ها را در برابر واکنش مخرب قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها بهبود بخشیده است. ۵- بین نتایج آزمایش‌های انبساط تسریع شده نمونه‌های منشوری ملات و تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ملات در محیطی مستعد وقوع *ASR*، ارتباط معناداری برقرار است.

۶- در مقابل پدیده مخرب واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها، ضعیف‌ترین عملکرد در بین سیمان‌های مورد بررسی در این مطالعه مرتبط با سیمان پرتلند آهکی حاوی ۲۰ درصد پودر سنگ-آهک و بهترین عملکرد نیز مرتبط با سیمان پرتلند پوزولانی حاوی ۲۰ درصد پوزولان طبیعی تراس بوده است.

۵- مراجع

[۱] مهتا و مونته‌ئرو، "پیش‌بینی ریزساختار، خواص، و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)"، مترجمین: رمضانپور، ع.ا، قدوسی، پ و گنجیان، ا، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ دوم، ۱۳۸۵.

[۲] حاجی‌قاسمعلی، س. "بررسی اثر واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه‌ها بر روی رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح تحت بار درازمدت"، رساله دکتری، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۶.

[3] Haymana S, Thomasa M, Beamana N, Gilksb P., "Selection of an effective ASR-prevention strategy for use with a highly reactive aggregate for the reconstruction of concrete structures at Mactaquac generating station", Cement and Concrete Research, 40 (4), pp 605-610, 2010.

[4] Chen H, Soles JA, Malhotra VM., "Selection of an effective ASR-prevention strategy for use with a highly reactive aggregate for the reconstruction of concrete structures at Mactaquac generating station", Cement and Concrete Composites, 15 (1-2), pp 75-84, 1993.

[5] Aquino W, Lange DA, Olek J., "The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali-silica reaction products", Cement and Concrete Composites, 23 (6), pp 485-493, 2001.

[6] Benmore CJ, Monteiro PJM, "The structure of alkali silicate gel by total scattering methods",

Moroccan Portland cement”, *Cement and Concrete Research*, 32 (10), pp 1597–1603, 2002.

[18] Vuk T, Tinta V, Gabrovsek R, Kaucic V., “The effects of limestone addition, clinker type and fineness on properties of Portland cement”, *Cement and Concrete Research*, 31 (1), pp 135–139, 2001.

[19] Ramezaniapour AA, Ghiasvand E, Nickseresht I, Mahdikhani M, Moodi F., “Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes”, *ement and Concrete Composite*, 31 (10), pp 715–720, 2009.

[20] ASTM C595, “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements”, ASTM International, West Conshohocken, 2005.

[21] ASTM C1157, “Standard Performance Specification for Hydraulic Cement”, ASTM International, West Conshohocken, 2003.

[۲۲] استاندارد ۳۸۹ ملی ایران، “ویژگی‌های سیمان پرتلند”،

تهران، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۷۸.

[۲۳] استاندارد ۱۷۵۱۸-۱ ملی ایران، “ویژگی‌های سیمان -

قسمت ۱”، تهران، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران،

۱۳۹۳.

[24] Hobbs, D.W. “Possible influence of small additions of PFA, GBFS and limestone flour upon expansion caused by the alkali-silica reaction”. *Magazine of Concrete Research*, 35, pp 55–58, 1983.

[25] Hasparyk N P, Monteiro P, Carasek H., “Effect of silica fume and rice husk ash on alkali-silica reaction”. *ACI Material Journal*, 97 (4), pp 486-492, 2000.

[26] Safeer A, Kazmi S, Munir M., “Potential of rice husk ash for mitigating the alkali-silica reaction in mortar bars incorporating reactive aggregates”, *Construction and Building Materials*, 132, pp 61-70, 2017

Durability of binary and ternary cements against alkali-silica reaction of aggregate

E. Ghiasvand *

Dept. of Engineering, Bu Ali Sina University, Kaboodrahang, Hamedan, I. R. of Iran

T. Maleki

Msc. Student of construction Engineering & Management, Islamic Azad University, Arak Branch

Abstract

In recent years, with regards to the environmental and economic considerations and the importance of sustainable development, it is well understood that part of the cement or clinker must be replaced with other materials such as limestone powder, natural and artificial pozzolans, slag, etc. in this paper, some physical properties and durability of Portland, Portland-pozzolan, Portland-limestone and Portland-composite cements against alkali-silica reaction (ASR) are studied. In order to, experiments were carried out cement paste including normal consistency and time of setting and on cement mortar including accelerated expansion test and compressive strength change of mortar cubes in situations where conditions are favorable for ASR. The results show that durability of cements containing Trass is higher than others and Portland limestone cement (PLC) having up to 10% limestone provides competitive properties with PC concretes. Also, there is significant relation between results obtained by accelerated expansion test and new method used in this study.

Keywords: Alkali-silica reaction (ASR), Limestone powder, Trass, Compressive strength, Accelerated expansion.

* Corresponding Author: e.ghiasvand@basu.ac.ir

